第38卷 第5期
2021年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 5
Sep. 2021

哈萨克斯坦首都努尔苏丹人工林健康评价

闫晋升[1,2,3]，王永东[1,3]，娄泊远[1,2,3]，艾柯代·艾斯凯尔[1,2,3]，徐新文[1,3]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院大学，北京 101408；
3. 国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：通过分析努尔苏丹不同人工林，筛选健康综合评价指标，建立健康综合评价模型，为努尔苏丹及其周边人工林提供健康综合评价理论基础。调查努尔苏丹25块人工林样地和2块天然林样地，选取林下植物Shannon-Wiener指数(X_1)、Pielou指数(X_2)、Simpson指数(X_3)、林分空间综合结构综合指数(X_4)、土壤有机质(X_5)、全氮(X_6)、全磷(X_7)、pH(X_8)、质量含水量(X_9)、林木平均株高(X_{10})、平均胸径(X_{11})、平均枝下高(X_{12})、平均冠幅(X_{13})和林下更新(X_{14})共14个指标，采用因子分析、聚类分析、判别分析和逐步回归分析等多元统计分析法，对努尔苏丹人工林健康状况开展综合评价。通过因子分析将14个单项指标转换为4个相互独立的综合指标，其贡献率分别为30.482%、24.374%、19.711%和8.646%，代表了全部数据83.212%的信息量。结合因子得分系数矩阵与各因子权重得到健康综合得分值。对健康综合得分值进行聚类分析，将选择的样地划分为5类，优质健康（Ⅰ）、良好健康（Ⅱ）、一般健康（Ⅲ）、亚健康（Ⅳ）和不健康（Ⅴ）。使用判别分析验证聚类分析的效果，其自身验证与交叉验证的准确率分别为100%、85.185%。采取逐步回归分析建立努尔苏丹人工林健康评价最优数学模型，$H=0+0.293X_{13}+0.186X_5+0.079X_3+0.100X_2+0.038X_7$ (R^2=0.987)，筛选出5个判断人工林健康状况的指标，分别为平均冠幅、土壤有机质、Simpson指数、Pielou指数和土壤全磷。平均冠幅、土壤有机质、Simpson指数、Pielou指数和土壤全磷可作为判断努尔苏丹人工林健康状况的指标，可在相同条件下测定这5项指标，计算健康综合评价值并预测其健康状况。

关键词：人工林；因子分析；聚类分析；判别分析；逐步回归分析；健康评价

森林是许多陆地生态系统的主要组成部分，除提供各种重要的经济产品，包括木材、纸浆、纤维和食物等，森林还提供各种各样的生态系统服务[1]。森林健康对于维持人类所依赖的服务和有效保护森林生物都很重要[2]。人工林覆盖面积目前占全球森林的7%，到21世纪末可能占到20%。然而，人工林种植树种较为单一，进行集约化管理，单一栽培林分的相对物种一致性使其更易出现健康问题[3]。虽然现有森林已经适应了某种程度的干扰，但所有森林现在都面临着新的压力，需要开发评估森林健康状况的系统[4]。因此，人工林健康评价作为人工林建设与可持续发展的基础，可为人工林的经营管理提供参考，使其不断向人类提供服务功能。

近年来，关于森林健康评价研究已有许多相关报道。前人研究对森林健康的定义不同，使用的评价指标与评价方式也不同。迄今为止，尚未有标准的评价模式[5]。Teale等[6]认为健康的森林在其结构方面必须是可持续的，且在不与可持续性相冲突的前提下满足生态或经济管理目标。高志亮等[7]认为健康的森林能够保持其生态系统的稳定并具有较好的自我调节能力，且能充分地持续发挥生态、社会和经济效益。Loehle等[8]认为森林健康与生物多样性、生态系统服务、森林经济价值等有关，在评估目前和未来的森林健康时，必须考虑多种因素，包括温度、降水（包括洪水和干旱）、二氧化碳浓度、氮沉降、空气污染物、病原菌和病虫害。Cale等[9]通过对群落结构的可持续性对森林健康进行了研究。刘晓农等[10]基于SOM神经网络，选取结构完整性、

收稿日期：2021-02-23； **修订日期**：2021-04-12
基金项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）(XDA20030102)；中国科学院关键技术人才项目（“一带一路”荒漠化防治技术模式研究）
作者简介：闫晋升(1996-)，男，硕士研究生，主要从事生态屏障建设研究. E-mail: 761478224@qq.com
通讯作者：王永东. E-mail: wangyd@ms.xjb.ac.cn

功能稳定性、系统活力性、可持续性4类评级指标对湖南省新化县森林进行健康评价。李显良等[11]基于熵权-云模型,选取结构性、活力、可持续性、抗干扰性4类评价指标对环洞庭湖森林健康评价。综合前人研究成果,本文认为健康的人工林应能在维持自身的发展的同时满足人类的需求。包括当前与未来系统稳定性的维持、多样性的保持以及满足人类的自然、社会、经济和文化需求。目前在森林健康的评价研究中存在的问题有:评价指标各异且繁多复杂;对于森林价值目标实现考虑较少;主要集中于静态健康评价,对于森林的动态趋势关注较少。针对当前研究存在的问题,本研究拟采用多元统计分析法,以林木生长量、林分空间结构、林下植物多样性、土壤理化性质和林下更新5类指标对努尔苏丹人工林进行健康评价,建立努尔苏丹人工林健康数学评价模型,明确判断努尔苏丹人工林健康状况的指标,为预测努尔苏丹人工林健康状况及可持续经营提供理论基础。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于哈萨克斯坦首都努尔苏丹市及其城市周边。该区域是典型的大陆性气候,努尔苏丹市被誉为世界第二冷的首都。冬季漫长、寒冷、少雪,夏季炎热、干燥。冬季长达5~5.5月,积雪期长达130~140 d,多年平均积雪厚度为30 cm。年平均气温3.2 ℃,1月的平均气温为-14.2 ℃,6月的平均气温为20.8 ℃。年日照时间为2200 h,无霜期120 d。年平均风速为3.4 $m\cdot s^{-1}$,其中7—8月风速最小,平均为2.8 $m\cdot s^{-1}$,2月风速最大,平均为3.9 $m\cdot s^{-1}$。秋冬季的主风向主要是南风和西南风,夏季则变为东北风。多年降水平均值为299.55 mm。从平均降水量来看,夏季降水所占份额最大,为年平均降水的41.08%,其次是秋季22.59%。59.74%的降雨量发生在作物生长季节,时间为从5—9月。多年潜在蒸散量均值为721.23 mm;多年干燥指数均值为0.55。该研究区域是典型的草地与人工林相结合的地区,人工林多为混交林。代表性的人工林造林树种有欧洲赤松(*Pinus sylvestris* L.)、梣叶槭(*Acer negundo* L.)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、榆树(*Ulmus pumila* L.)、黑茶藨子(*Ribes nigrum* L.)、悬钩子(*Rubus* L.)和红瑞木(*Cornus alba* L.)等。在植树造林之前,该地区是一片广阔的草原。

选用该地区25块人工林与2块天然林共27个样地,对该地区人工林的健康状况进行评价。该地区地势平缓。人工林多为幼龄林,幼龄林随着林龄的增加,人工林的林下植物多样性水平得以增加、林下更新增加、土壤理化性质得以改善,而中林龄及其之后林下植物多样性随着林龄增加先增加后降低。全氮含量随林龄增大而增加,土壤有机质随林龄增大而显著增加,全磷含量随林龄增大变化不显著,土壤pH值随林龄增大而下降。样地具体信息见表1。

1.2 数据来源与处理

为了科学评价研究区人工林的健康状况,针对努尔苏丹人工林的生长及分布情况,结合该地区遥感图,基于哈萨克斯坦林业委员会对人工林林班的划分与前期的监测,遵循全面性、代表性和典型性原则选取了27块分析样地。野外调查于2019年8—10月开展,使用样方法对选取样地进行调查。样方大小根据林地实际情况灵活设置,但遵循以下原则:(1)样方的总面积不小于600 m^2;(2)单个样方的规格不小于10 m×10 m;(3)每块样地的样方重复不少于3次。此外,要在每个样方的四角和中心设置1 m×1 m的草本样方5个。调查内容包括:(1)样地基本信息:经纬度、海拔、林地树种配置方式和龄组划分等;(2)林木进行每木检尺,记录每棵树木种名称、位置、树高、胸径(基径)、枝下高、树冠冠幅等,同时记录林下更新状况;(3)采用结构化森林经营数据调查技术规程的数据调查方法调查林分空间结构特征[12],采用平移式8领域大样地法消除处于林分边缘树木的系统影响[13];(4)对于草本层植物,采用法瑞学派调查方法调查草本植物频度、盖度、高度、多优度、群聚度等;(5)土壤样品的采集通过挖土壤剖面与人工土钻的方式获得,土壤质量含水量测定深度为0~300 cm,其余土壤指标测定土层深度为0~60 cm,每20 cm取样一次,3次重复。土壤理化性质在实验室内测得。

在Excel 2010中进行数据处理,在Excel 2010与SPSS 26.0中进行数据分析。

1.3 研究方法

1.3.1 评价指标体系构建 基于人工林生态价值、生活价值、美学价值和文化价值4个方面,根据科学

表1 样地信息表

Tab. 1 Plot information table

样地	经纬度	海拔/m	树种配置	龄组划分	种植年份	林带走向
M_1	50°59′51.39″N,71°24′13.11″E	364	A-P-A-P-A	幼龄林	2003	N-S
M_2	50°59′42.85″N,71°25′33.48″E	351	U-A-U-A	幼龄林	2003	N-S
M_3	50°55′41.98″N,71°23′39.47″E	346	M-A-P-A-P-M	幼龄林	2010	N-S
M_4	50°55′39.56″N,71°23′52.77″E	361	M-S-Po-S-E	幼龄林	2010	N-S
M_5	50°57′45.52″N,71°24′45.64″E	354	F-E-A-A-E-A	幼龄林	2009	NW-SE
M_6	51°10′41.84″N,71°38′52.43″E	436	P-P-P-C-C	成熟林	1970	NW-SE
M_7	51°11′06.17″N,71°39′12.21″E	429	B(天然林)	中龄林	天然林	天然林
M_8	51°11′09.35″N,71°39′08.50″E	418	Co-P-B-P-H	幼龄林	2015	NW-SE
M_9	51°14′10.48″N,71°42′59.20″E	411	M-M-M-M-M-M	过熟林	1963	N-S
M_{10}	51°14′17.69″N,71°43′14.50″E	414	P-P-P-P-P-P	成熟林	1970	NW-SE
M_{11}	51°14′15.15″N,71°43′27.51″E	427	B-B-B-A-Co	幼龄林	2004	NE-SW
M_{12}	51°14′15.56″N,71°43′20.49″E	419	U-P-U-P-U	幼龄林	2015	NE-SW
M_{13}	51°09′11.42″N,71°40′04.05″E	383	R-B-B-B-R	幼龄林	2003	NE-SW
M_{14}	51°09′11.28″N,71°36′58.95″E	382	B(天然林)	中龄林	天然林	天然林
M_{15}	51°09′11.32″N,71°39′47.07″E	385	P-P-P-P-P	幼龄林	2016	NE-SW
M_{16}	51°03′36.37″N,71°57′03.96″E	378	U-B-B-U-E	幼龄林	2004	NE-SW
M_{17}	51°05′38.27″N,71°48′22.11″E	370	A-A-A-B-B	幼龄林	2005	W-E
M_{18}	51°04′09.34″N,71°50′06.25″E	383	B-B-B-A-R	幼龄林	2005	NE-SW
M_{19}	51°33′05.25″N,71°07′13.07″E	442	B-B-B-B-M	幼龄林	2007	NE-SW
M_{20}	51°32′03.96″N,71°05′33.42″E	437	B-B-B-B-B-Co	幼龄林	2007	NE-SW
M_{21}	51°24′24.88″N,71°18′25.51″E	356	E-M-E-Co	幼龄林	2009	NW-SE
M_{22}	51°14′29.25″N,71°39′21.05″E	400	R-R-E-E-E	幼龄林	2004	NE-SW
M_{23}	51°12′03.02″N,71°41′53.49″E	418	P-P-P-Co-A-R-R	幼龄林	2004	W-E
M_{24}	51°11′31.71″N,71°39′26.49″E	429	E-E-E-A-A	幼龄林	2003	N-S
M_{25}	51°11′03.48″N,71°05′12.39″E	356	Co-A-A-A-E	幼龄林	2008	W-E
M_{26}	51°08′03.07″N,71°01′53.97″E	367	Ri-A-U-U-A-Ri	幼龄林	2008	NE-SW
M_{27}	51°05′59.03″N,71°04′17.72″E	349	Ri-U-U-U-U-A	幼龄林	2008	W-E

注：A：梣叶槭（*Acer negundo* L.）；P：欧洲赤松（*Pinus sylvestris* L.）；M：苹果（*Malus pumila* Mill.）；S：垂柳（*Salix babylonica* L.）；Po：杨属（*Populus* L.）；E：沙枣（*Elaeagnus angustifolia* L.）；F：白蜡树（*Fraxinus chinensis* Roxb.）；C：树锦鸡儿（*Caragana arborescens* Lam.）；B：白桦（*Betula platyphylla* Sukaczev.）；H：沙棘（*Hippophae rhamnoides* L.）；Co：红瑞木（*Cornus alba* L.）；U：榆树（*Ulmus pumila* L. ）；R：悬钩子（*Rubus* L.）；Ri：黑茶藨子（*Ribes nigrum* L.）。

性、客观性、系统性、可操作性和适用性的原则[14-17]，选取有代表性、可获取性、可量化性的评价指标共计14个，指标及其计算方法如下：(1) 林木生长量指标：平均胸径、平均树高、平均冠幅、平均枝下高通过计算野外调查结果均值得到；(2) 林下植物多样性指标：Shannon-Wiener指数、Pielou指数、Simpson指数参照方精云等的[18]计算方法进行计算；(3) 土壤理化性质指标：土壤有机质、全氮、全磷、pH、质量含水量数值通过计算不同土层深度测定结果的均值得到；(4) 林下更新指标：根据森林资源连续清查技术规程进行量化[19]。(5) 林分空间结构综合指数(FSI)的计算方法如公式1[20-21]。

$$FSI = \sqrt{(MA-1)2+(UA-0.25)2+(WA-0.5)2+(K-1)2} \quad (1)$$

式中：MA 为林分平均混交度；UA 为林分平均大小比数；WA 为林分平均角尺度；K 为林木拥挤度均值。

MA、UA、WA 的计算方法详见结构化森林经营数据调查技术规程[12]；K 的计算方法参照惠刚盈等研究成果[21]。

林木生长量能够反映人工林的生长情况与生长规律，能够反映经营成效，表示人工林的生态价值、生活价值和美学价值。林下植物多样性是人工林生态系统完整性的基础，代表人工林的生态价值，同时一定程度上能够提升人工林的生活价值、

美学价值和文化价值。土壤作为人工林必需的生态因子，其理化性质影响着人工林生态系统的物质循环和能量流动，体现人工林的生态价值。人工林能否进行天然更新能关系到实现可持续经营目标的实现，代表人工林的生态价值，同时关系到未来所有价值的实现。林分空间结构能够反映林内种间的空间格局，对人工林的稳定性与人工林的经营十分重要，体现人工林的生态价值、生活价值和文化价值。

1.3.2　*分析方法*　本研究综合使用多元统计分析中的因子分析法、聚类分析法、判别分析法和逐步回归对哈萨克斯坦首都努尔苏丹人工林进行健康评价研究。

首先对各健康评价指标进行分类，分为正相关指标、负相关指标和双向指标。正相关指标取值越大表示人工林健康状况越好。负相关指标取值越小表示人工林健康状况越好。双向指标取值在某个区间时表示人工林健康状况更好。负相关指标进行相反数转换。对处理后的指标数据使用Z-score法进行标准化（双向指标影响不大，仍使用Z-score法进行标准化）。然后对各样地的评价指标数据进行因子分析降维，并计算各因子得分值和各样地健康综合得分值。进行因子分析前，先对评价指标数据进行KMO检验（Kaiser-Meyer-Olkin test）和Bartlett球形检验（Bartlett's test），以检验数据是否适合因子分析。依据因子分析结果以及解释的总方差，按照特征值大于1的原则提取主成分，得到因子得分系数矩阵。健康综合得分值的计算公式如下：

$$H_j = W_m \sum_{i=1}^{n} (V_{mi} \times Z_{ij}) \tag{2}$$

式中：H_j为第j个样地健康得分值；W_m为第m个因子在所有因子中所占的权重；V_{mi}为第m个因子第i个指标的得分系数；Z_{ij}为第j个样地第i个指标的标准化值。

对各个样地的健康综合得分值进行系统聚类并划分健康等级，使用Ward聚类分析法将人工林健康划分为优质健康（Ⅰ）、良好健康（Ⅱ）、一般健康（Ⅲ）、亚健康（Ⅳ）和不健康（Ⅴ）共5个等级。使用Fisher判别法，对每块样地各因子得分值建立判别函数，使用判别模型对聚类分析结果进行验证。最后通过逐步回归分析建立人工林健康评价数学模型。

2　结果与分析

由于人工林生态系统的复杂性，所选取的各单项指标之间存在或强或弱的相关性，使得各个单项指标所提供的信息量存在一定程度的重叠，表明人工林健康状况是一个复杂的综合体。此外，各单项指标在人工林健康状况中所体现的作用也不尽相同，直接利用各单项指标不能准确、直观、系统地对人工林健康状况做出评价。因此，为弥补单项指标评价所不足之处，在此使用多元统计方法进行综合评价分析。

2.1　人工林健康评价因子筛选与分析

以所选样地的14个单项指标为基础进行健康评价指标的因子分析，将数据信息浓缩。首先分析研究数据是否适合进行因子分析，由KMO检验得到KMO为0.621，大于0.6，通过KMO检验，满足因子分析的前提要求，意味着数据可用于因子分析研究。以及数据通过Bartlett球形检验（$P<0.05$），说明研究数据适合进行因子分析。

将特征值大于1作为标准，同时结合碎石图辅助判断因子提取个数（图1）。由表2可知，本次共提取了4个因子，4个因子旋转后的方差解释率分别为30.482%、24.374%、19.711%、8.646%，旋转后累积方差解释率达到83.212%。说明这4个因子能够提取14个评价指标83.212%的信息量。通过计算得到旋转后4个因子各自的权重依次为36.632%、29.291%、23.688%和10.390%。

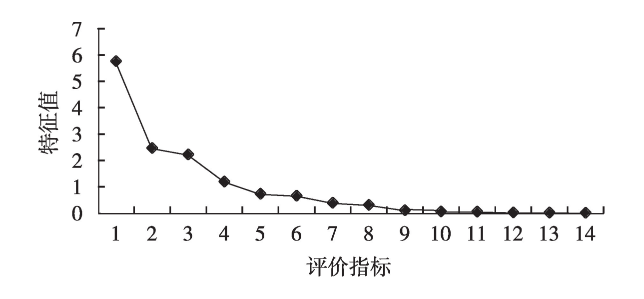


图1　碎石图

Fig. 1　Scree plot

旋转后的成分矩阵反映了评价指标与因子的相关程度。从表3可以看出，因子F_1与林木株高、胸径、枝下高和冠幅指标相关性较高，可以认为其主要代表林木生长量指标；因子F_2与Shannon-Wiener指数、Pielou指数、Simpson指数和林分空间结构的

表2 方差解释率

Tab. 2 Variance explained

因子	初始特征值			旋转后的特征值		
	特征值	方差百分比/%	累积/%	特征值	方差百分比	累积/%
F_1	5.765	41.181	41.181	4.267	30.482	30.482
F_2	2.468	17.630	58.811	3.412	24.374	54.855
F_3	2.223	15.878	74.689	2.760	19.711	74.566
F_4	1.193	8.523	83.212	1.210	8.646	83.212

表3 旋转后的成分矩阵

Tab. 3 Rotated component matrix

指标		成分				指标		成分			
		1	2	3	4			1	2	3	4
Shannon-Wiener指数	X_1	0.216	0.947	−0.008	−0.038	pH	X_8	−0.653	−0.043	−0.126	0.195
Pielou指数	X_2	0.260	0.909	−0.054	−0.036	质量含水量	X_9	−0.329	0.254	0.657	−0.196
Simpson指数	X_3	0.155	0.966	0.118	0.065	平均株高	X_{10}	0.924	0.256	0.048	0.026
FSI	X_4	0.109	0.633	0.388	0.093	平均胸径	X_{11}	0.911	0.230	−0.034	0.118
有机质	X_5	0.512	0.076	0.791	−0.120	平均枝下高	X_{12}	0.940	0.146	0.058	−0.106
全氮	X_6	0.311	0.043	0.867	0.038	平均冠幅	X_{13}	0.806	0.375	0.157	0.373
全磷	X_7	−0.062	−0.011	0.856	0.226	林下更新得分	X_{14}	−0.040	0.028	0.047	0.942

综合指数有较高的相关性，故可以认为该因子代表林下植物多样性与林分空间结构指标；因子F_3与土壤全氮、全磷、pH、质量含水量相关性高，其主要可代表土壤指标；因子F_4与林下更新具有高相关性，故可以认为可代表林下更新指标。

根据因子得分系数矩阵，提取出来的新的因子与原始变量之间的关系表达式为：

$$F_1 = -0.050X_1 - 0.031X_2 - 0.078X_3 - 0.065X_4 + 0.103X_5 + 0.043X_6 - 0.061X_7 - 0.180X_8 - 0.152X_9 + 0.231X_{10} + 0.233X_{11} + 0.251X_{12} + 0.171X_{13} - 0.035X_{14};$$

$$F_2 = 0.315X_1 + 0.298X_2 + 0.319X_3 + 0.192X_4 - 0.070X_5 - 0.066X_6 - 0.046X_7 + 0.063X_8 + 0.103X_9 - 0.022X_{10} - 0.029X_{11} - 0.060X_{12} + 0.019X_{13} - 0.014X_{14};$$

$$F_3 = -0.060X_1 - 0.077X_2 - 0.011X_3 + 0.111X_4 + 0.281X_5 + 0.318X_6 + 0.330X_7 - 0.021X_8 + 0.262X_9 - 0.038X_{10} - 0.070X_{11} - 0.026X_{12} - 0.005X_{13} - 0.004X_{14};$$

$$F_4 = -0.063X_1 - 0.060X_2 + 0.021X_3 + 0.049X_4 - 0.131X_5 + 0.004X_6 + 0.169X_7 + 0.180X_8 - 0.180X_9 - 0.004X_{10} + 0.076X_{11} - 0.112X_{12} + 0.281X_{13} + 0.785X_{14}。$$

计算得到各个样地的4个因子得分值，再结合4个因子各自的权重得到健康综合得分值，如表4所示。可见健康综合得分值最高的样地为M_{14}白桦天然林样地，说明其健康状况最佳。该天然林样地属于中龄林，群落垂直结构为复层型“乔+灌+草”，物种丰富度较大，林下更新较多且株高较高（>50 cm）。在所有研究样地中土壤有机质、全氮、全磷含量最高。健康综合得分值最低的样地为M_{15}欧洲赤松人工纯林，其属于幼龄林，无林下草本层。

2.2 人工林健康等级分类

根据各样地健康综合得分，采用Ward法进行聚类分析，将各样地健康状况划分为5类，健康综合得分H_j值的范围为[−1.59，1.05]，优质健康（Ⅰ）的样地有2块，H_j值的范围为[0.94，1.05]，占总调查样地数7.407%；良好健康（Ⅱ）的样地有3块，H_j值的范围为[0.52，0.76]，占总调查样地数11.111%；一般健康（Ⅲ）的样地有12块，H_j值的范围为[−0.07，0.21]，占总调查样地数44.444%；亚健康（Ⅳ）的样地有8块，H_j值的范围为[−0.35，−0.17]，占总调查样地数29.630%；不健康（Ⅴ）的样地有2块，H_j值的范围为[−1.59，−1.02]，占总调查样地数7.407%。总体来说，努尔苏丹人工林健康状况较好，处于Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级的样地占比为62.963%。

为了验证聚类分析的效果，以Ward聚类分析得到的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ共5类健康状况作为5个不同

表4　各样地因子得分矩阵

Tab. 4　Plot factors score matrix

样地	健康综合得分	因子得分				样地	健康综合得分	因子得分			
		1	2	3	4			1	2	3	4
M_1	0.020	−0.233	−0.383	0.329	1.325	M_{15}	−1.590	−0.576	−3.267	−1.454	−0.745
M_2	0.520	0.302	−0.270	0.873	2.675	M_{16}	0.140	−0.028	0.658	−0.997	1.844
M_3	−0.170	−0.627	0.385	−0.229	−0.032	M_{17}	−0.350	−0.308	0.440	−1.405	−0.275
M_4	−0.260	−0.793	−0.029	0.144	0.014	M_{18}	−0.220	−0.158	0.507	−1.246	−0.106
M_5	−0.180	−0.499	−0.277	0.322	0.101	M_{19}	0.210	0.082	−0.305	1.297	−0.411
M_6	0.760	2.395	−0.387	−0.046	0.053	M_{20}	0.170	−0.251	0.229	1.021	−0.459
M_7	0.620	1.254	0.113	0.768	−0.567	M_{21}	0.050	−0.531	0.509	0.835	−0.969
M_8	−0.210	0.206	−0.228	−0.911	−0.063	M_{22}	−0.060	−1.382	1.398	0.817	−1.465
M_9	0.200	−0.107	0.928	0.159	−0.659	M_{23}	−0.350	−0.456	0.445	−1.161	−0.343
M_{10}	0.940	2.896	0.643	−1.083	−0.496	M_{24}	0.070	−0.357	0.491	−0.636	1.971
M_{11}	−0.070	0.129	0.588	−0.858	−0.824	M_{25}	−0.250	−0.999	−0.284	0.954	−0.240
M_{12}	−1.020	−0.299	−2.704	−0.171	−0.796	M_{26}	0.040	−0.546	−0.479	0.873	1.649
M_{13}	−0.050	−0.095	1.167	−1.325	−0.382	M_{27}	0.000	−0.905	0.492	0.944	−0.343
M_{14}	1.050	1.885	−0.380	2.184	−0.459						

的总体。将通过因子分析法得到的4个因子F_1、F_2、F_3、F_4作为Fisher线性判别分析模型的4个判别指标,按照Fisher线性判别分析法,根据标准化的Fisher线性判别函数系数得到Fisher判别函数如下:

$$Y_1=1.433F_1+1.684F_2+1.837F_3+1.091F_4;$$

$$Y_2=0.773F_1-0.632F_2+0.127F_3-0.211F_4;$$

$$Y_3=-0.100F_1-0.163F_2+0.398F_3+0.806F_4;$$

$$Y_4=-0.110F_1-0.048F_2+0.751F_3-0.488F_4。$$

第一判别函数与因变量具有很强的相关性,相关系数(R)为0.982,说明第一判别函数是重要的分类维度,可以较好地区分各类,如图2所示。表5为判别函数在各分类的中心值。将各样地的因子得分代入判别函数表达式计算结果作为待判函数值,

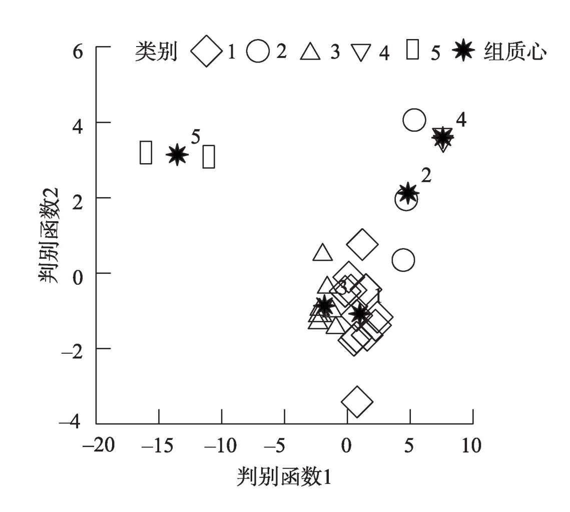


图2　基于Fisher判别函数的各类散点图

Fig. 2　Various scatter plots based on Fisher discriminant function

表5　Fisher判别函数在各分类的中心值

Tab. 5　Values of discriminant function at group centre

聚类编号	健康等级	判别函数			
		Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	Ⅲ	0.993	−1.077	0.094	0.139
2	Ⅱ	4.828	2.122	0.592	−0.204
3	Ⅳ	−1.817	−0.865	−0.224	−0.196
4	Ⅰ	7.600	3.593	−0.663	0.129
5	Ⅴ	−13.536	3.142	0.106	0.129

比较待判的函数值与表5中5类健康状况组别的中心值的距离来进行分类,即对它们取差值后取绝对值,分类结果为绝对值最小的所在分组。

对健康等级结果进行验证,自身验证法对Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ健康等级的判断正确率都为100%,交互验证对Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ健康等级的判断正确率均值为85.185%,有4个判断错误,误判皆为距离正确结果最近的健康等级,为非严重误判。分别为Ⅲ类误判为Ⅳ类,Ⅱ类误判为Ⅰ类与Ⅲ类,Ⅰ类误判为Ⅱ类,误判原因可能由于个别样地相似度较高,有较强的关联性,从而造成了误判。综上,表明所建立的判别函数有效,聚类分析结果是比较准确,能对林地健康状况进行有效地分类。

通过计算样地所在健康等级的频数得到各个健康等级样地所占全部调查样地的百分比,并对所有样地共27个健康评价值按数值大小进行排序。以此百分比计算相应的百分位数。利用百分位数

进行健康等级的数值区间的划分。划分为:优质健康(Ⅰ):H_j≥0.773;良好健康(Ⅱ):0.267≤H_j<0.773;一般健康(Ⅲ):-0.107≤H_j<0.267;亚健康(Ⅳ):-0.400≤H_j<-0.107;不健康(Ⅴ):H_j<-0.400。

从林木生长量来看,处在Ⅰ、Ⅱ等级的样地的林木树高、胸径显著大于处在Ⅳ、Ⅴ等级的样地的林木。从林下植物多样性来看,处在Ⅰ、Ⅱ等级样地的Shannon-Wiener指数、Pielou指数和Simpson指数分别高于处在Ⅳ、Ⅴ等级的样地45.947%、51.770%和35.974%。从FSI来看,处在Ⅰ、Ⅱ等级的样地空间结构合理度略优于处在Ⅳ、Ⅴ等级的样地。从土壤指标来看,处在Ⅰ、Ⅱ等级的样地的土壤有机质、全氮、全磷、质量含水量分别高于处在Ⅳ、Ⅴ等级的样地123.917%、65.093%、18.327%和10.408%,分别高于处在Ⅲ等级的样地48.022%、21.171%、10.498%和-5.390%,其中优质健康和健康样地的质量含水量均值低于一般健康样地,可能是因为优质健康和健康样地的林木林龄相对较大,耗水较多。且处在Ⅰ、Ⅱ等级的样地的土壤pH值较为适中,均值为7.075,处在Ⅳ、Ⅴ等级的样地的土壤pH均值为8.258。从林下更新来看,处在Ⅰ、Ⅱ等级的样地的林下更新水平显著高于处在Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ等级的样地。

努尔苏丹人工林多处于幼龄阶段,幼龄林健康状况处在Ⅱ、Ⅲ等级的样地占比为54.546%。中林龄白桦天然林样地健康状况分别处在Ⅰ、Ⅱ等级,成熟林分别处在Ⅰ、Ⅱ等级,过熟林样地健康状况处在Ⅲ等级。整体来讲,努尔苏丹人工林未来发展状况较为乐观,幼林龄虽多处于一般健康和亚健康,但这与将不同龄组一同进行评价有关,且显然幼林龄在生长量方面较林龄较大的林分有相对劣势。成熟林人工林样地M_{10}、M_6仅次于一块中林龄天然林样地M_{14}位居健康状况2、3位,表明随着林龄的增加,人工林的林下植物多样性水平得以增加、林下更新增加、土壤理化性质得以改善。且成熟林样地的树种配置方式分别为欧洲赤松纯林和欧洲赤松与树锦鸡儿的混交林,而幼林龄的树种配置方式多为乔灌混交,较其更具科学性。对于划分为不健康的人工林样地M_{12}、M_{15},其原因在于两块样地皆无林下草本植物与林木更新,这与其他样地或多或少都有林下草本不同。土壤有机质、全氮、全磷含量也因此很低,这可能是由于人为原因导致。过熟林样地被划分在Ⅲ等级,这与森林正常的生长发育过程相一致。

总体来看,努尔苏丹人工林健康状况较好,可适当对人工林进行经营,以促进人工林稳定发展。

2.3 人工林健康预测

过多的参数也会影响评价模型的精度。为了便于开展努尔苏丹人工林健康评价,筛选出判断人工林健康状况的重要指标,获得人工林健康状况评价数学模型,以健康综合评价值作为因变量,各单项指标Z-score标准化值为自变量进行多元线性逐步回归,建立最优回归方程:

$$H = 0 + 0.293X_{13} + 0.186X_5 + 0.079X_3 + 0.100X_2 + 0.038X7(R^2 = 0.987,\ F = 381.471,\ P = 0.000)$$

将27块样地的原始数据带入回归方程得到预测综合得分,85.185%的预测得分落入了正确的健康等级区间内。未能成功预测的样地集中于优质健康(Ⅰ)和良好健康(Ⅱ)两个等级,这与这两个等级样本量较少有关。就人工林健康状况而言,我们通常首先对亚健康与不健康的人工林实施经营措施,因此对于实际应用影响较小。研究结果表明,平均冠幅、有机质、Simpson指数、Pielou指数和全磷5个指标可作为判断哈萨克斯坦首都努尔苏丹人工林健康的评价指标。因此,在相同条件下测定努尔苏丹其他林地的上述5个指标,将测定数据代入该方程便可计算健康综合评价值,根据已划分的健康等级数值区间预测其健康状况。

3 讨 论

人工林健康状况是一个十分复杂的综合体,不同学者对其的理解与侧重点不同。人工种植的人工林能够提供相应的社会、经济和生态服务功能,其健康状况关乎到人工林可持续经营与所提供服务质量的高低。人工林不同评价指标的选取与不同综合评价方法的选用使得健康评价所突出重点也不同,评价结果也相应不同[22-25]。

人工林作为复杂系统,其数据结构具有复杂性,并且各变量之间存在一定的联系。进行人工林健康评价必须同时考虑多个变量。选取的评价指标数据具有多元数据的特征,因此适合选用多元统计方法进行健康评价。本研究结合使用多种多元统计方法,尝试探索一种能够解决目前森林健康评

价中评价指标不同、考虑森林价值目标较少与关注森林的动态较少问题的评价方法。

为了尽可能地客观真实对努尔苏丹人工林进行健康评价，本研究着重从指标体系的构建、指标权重的赋值、评价结果的验证以及对努尔苏丹其他人工林健康状况的预测等方面进行了研究。本研究注重定量评价指标的选取和选取指标与人工林健康内涵的契合。从人工林的生态价值、生活价值、美学价值和文化价值出发，选择能直观反映人工林状况的14个容易测定与量化的客观指标，从不同角度来反映人工林的价值目标。关注人工林未来的发展趋势。将不同林龄的森林一同进行健康评价，尝试在相近的立地条件下，以当前的健康状况对未来人工林的健康状况及发展趋势做出预测，经综合评价得出努尔苏丹人工林发展趋势良好。侧重指标权重赋值与评价结果的客观性。通过对选取的评价指标进行因子分析，降维处理得到4个因子，将14个单项指标转化为4个彼此相互独立的综合指标，避免了评价因子之间的信息重叠与专家打分指标的主观性。通过因子得分系数与因子各自的权重得到综合健康得分值，相较于层次分析法等对指标权重的赋值更具有客观性，有助于提高评价结果的客观程度。重视评价结果的有效性。对综合健康得分值聚类分析，并使用判别分析验证了聚类分析结果的可靠性，通过百分位数将研究样地划为5类。看重评价指标的简化，在保证评价结果有效的基础上以期减少现实野外工作的力度与难度。采取逐步回归分析筛选出5个判断努尔苏丹人工林健康状况的指标。平均冠幅、土壤有机质、Simpson指数、Pielou指数和土壤全磷5个指标被筛选出来，能够较好地判断努尔苏丹人工林健康状况，对于指导努尔苏丹人工林经营具有一定的实用意义。

4 结 论

将27块努尔苏丹研究样地健康状况划分为优质健康(Ⅰ)、良好健康(Ⅱ)、一般健康(Ⅲ)、亚健康(Ⅳ)和不健康(Ⅴ)5类；优质健康(Ⅰ)的样地占7.407%；良好健康(Ⅱ)的样地占11.111%；一般健康(Ⅲ)的样地占44.444%；亚健康(Ⅳ)的样地占29.630%；不健康(Ⅴ)的样地占7.407%；Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级的样地占比为62.963%。研究表明采用多元统计分析法对努尔苏丹人工林进行评价较为科学；当前努尔苏丹人工林整体健康状况较好，对努尔苏丹人工林未来发展持乐观态度；平均冠幅、有机质、Simpson指数、Pielou指数和全磷5个指标可作为判断努尔苏丹其他人工林健康状况的评价指标。

参考文献(References)：

[1] Boyd I L, Freer-Smith P H, Gilligan C A, et al. The consequence of tree pests and diseases for ecosystem services[J]. Science, 2013, 342(6160): 823–830.

[2] Andrew, Sugden, Julia, et al. Forest health. Forest health in a changing world. Introduction[J]. Science, 2015, 349(6250), 800–801.

[3] Wingfield M J, Brockerhoff E, Wingfield B D, et al. Planted forest health: The need for a global strategy[J]. Science, 2015, 349 (6250): 832–836.

[4] Trumbore S, Brando P, Hartmann H. Forest health and global change[J]. Science, 2015, 349(6250): 814.

[5] 王秋燕, 陈鹏飞, 李学东, 等. 森林健康评价方法综述[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(2): 177–183. [Wang Qiuyan, Chen Pengfei, Li Xuedong, et al. Review of forest health assessment methods[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(2): 177–183.]

[6] Teale S, Castello J. Forest Health: An Integrated Perspective[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 3–16.

[7] 高志亮, 余新晓, 陈国亮, 等. 北京市八达岭林场森林健康评价研究[J]. 林业资源管理, 2008, 37(4): 77–82. [Gao Zhiliang, Yu Xinxiao, Chen Guoliang, et al. Forest health assessment in Badaling forest farm of Beijing[J]. Forest Resources Management, 2008, 37(4): 77–82.]

[8] Loehle Craig, Idso Craig, Bently Wigley T. Physiological and ecological factors influencing recent trends in United States forest health responses to climate change[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 363: 179–189.

[9] Cale J A, Klutsch J G, Erbilgin N, et al. Using structural sustainability for forest health monitoring and triage: Case study of a mountain pine beetle (Dendroctonus ponderosae)-impacted landscape[J]. Ecological Indicators, 2016, 70(11): 451–459.

[10] 刘晓农, 宋亚斌, 邢元军. 基于SOM神经网络的新化县森林健康评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(4): 21–26. [Liu Xiaonong, Song Yabin, Xing Yuanjun. Forest health assessment of Xinhua county based on SOM neural network[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2017, 37(4): 21–26.]

[11] 李显良, 张贵, 李建军. 基于熵权-云模型的环洞庭湖森林健康评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(11): 119–128. [Li Xianliang, Zhang Gui, Li Jianjun. Assessment of forest health

around Dongting lake based on entropy weight-cloud model[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2020, 40(11): 119–128.]

[12] 中国林业科学研究院林业研究所. 结构化森林经营数据调查技术规程(LY/T 2811–2017)[S]. 国家林业局, 2017. [Research Institute of Forestry Chinese Academy of Forestry. Survey of Data Technical Specification of Structure-based Forest Management(LY/T 2811–2017)[S]. The State Forestry Administration of the People's Republic of China, 2017.]

[13] 周红敏, 惠刚盈, 赵中华, 等. 林分空间结构分析中样地边界木的处理方法[J]. 林业科学, 2009, 45(2): 1–5. [Zhou Hongmin, Hui Gangying, Zhao Zhonghua, et al. Treatment methods of plot boundary trees in spatial forest structure analysis[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(2): 1–5.

[14] 王方. 金沟岭林场落叶松人工林健康评价与经营研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012. [Wang Fang. Health Assessment and Management Model of Larch Plantation in Jingouling Forest Farm [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.]

[15] 许俊丽. 基于群落结构、更新能力及土壤质量的上海城市森林健康评价研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2018. [Xu Junli. Study on Urban Forest Health Evaluation Based on Community Structure, Regeneration Capacity and Soil Quality in Shanghai[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.]

[16] 马志林, 陈丽华, 于显威, 等. 森林生态系统健康评估模式分析与构建[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2009, 30(3): 264–270.[Ma Zhilin, Chen Lihua, Yu Xianwei, et al. Construct and analysis for healthy assessment mode of forest ecological system[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2009, 30(3): 264–270.]

[17] 陈高, 代力民, 姬兰柱, 等. 森林生态系统健康评估 Ⅰ. 模式、计算方法和指标体系[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1743–1749. [Chen Gao, Dai Limin, Ji Lanzhu, et al. Assessing forest ecosystem health I. model, method, and index system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1743–1749.]

[18] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533–548. [Fang Jingyun, Wang Xiangping, Shen Zehao, et al. Methods and protocols for plant community inventory[J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6): 533–548.

[19] 国家林业和草原局调查规划设计院. 森林资源连续清查技术规程(GB/T 38590–2020)[S]. 国家林业和草原局, 2020. [Investigation, Planning and Design Institute of State Forestry and Grassland Administration. Technical Regulations for Continuous Forest Inventory(GB/T 38590–2020)[S]. National Forestry and Grassland Administration, 2020.]

[20] 惠刚盈, 胡艳波, 刘瑞红. 森林观察研究中的林分空间优势度分析方法[J]. 温带林业研究, 2019, 2(1): 1–6, 12. [Hui Gangying, Hu Yanbo, Liu Ruhong. Methods of analyzing stand spatial dominance in forest observational studies[J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2019, 2(1): 1–6, 12.]

[21] 惠刚盈, 张连金, 胡艳波, 等. 林分拥挤度及其应用[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(10): 1–6. [Hui Gangying, Zhang Lianjin, Hu Yanbo, et al. Stand crowding degree and its application[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(10): 1–6.]

[22] 徐来仙, 姚兰, 郭秋菊, 等. 鄂西南利中盆地马尾松天然次生林森林健康评价[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41(3): 69–77. [Xu Laixian, Yao Lan, Guo Qiuju, et al. Forest health assessment of *Pinus massoniana* natural secondary forest in Lizhong basin in southwestern Hubei[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences), 2021, 41(3): 69–77.]

[23] 谷鑫鑫, 司剑华. 基于层次分析法的西宁市油松人工林健康评价[J]. 青海大学学报, 2020, 38(3): 34–43. [Gu Xinxin, Si Jianhua. Health evaluation of *Pinus tabuliformis* Carr. plantation in Xining City based on analytic hierarchy process[J]. Journal of Qinghai University, 2020, 38(3): 34–43.]

[24] 赵勇钧, 谢阳生, 王建军, 等. 基于多元统计分析的马尾松人工林健康评价研究——以广西热带林业实验中心为例[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(7): 100–107. [Zhao Yongjun, Xie Yangsheng, Wang Jianjun, et al. Health assessment of *Pinus massoniana* plantation on multivariate statistical analysis: A case study of Guangxi tropical forestry experimental center[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2019, 39 (7): 100–107.]

[25] 郑学良, 陈丽华, 李洪洋, 等. 基于水源涵养功能的辽东防护林体系健康评价[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(2): 102–110. [Zheng Xueliang, Chen Lihua, Li Hongyang, et al. Health assessment of Liaodong shelterbelt system based on water conservation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(2): 102–110.]

Health assessment of plantations in Nursultan, capital of Kazakhstan

YAN Jinsheng[1,2,3], WANG Yongdong[1,3], LOU Boyuan[1,2,3], Akida Askar[1,2,3], XU Xinwen[1,3]

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 3. National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: The study was performed in Nursultan and its surroundings. Its principal aims are to explore the methods of plantation health assessment, analyze different plantations, screen suitable assessment indexes of plantation health, and establish an evaluation model of plantation health, which would provide theoretical support for health assessment in the region. Twenty-five plantation plots and two natural forest plots were analyzed. Shannon-Wiener index (X_1), Pielou index (X_2), Simpson index (X_3), stand spatial structure optimization object function(X_4), soil organic matter content (X_5), soil total nitrogen content (X_6), soil total phosphorus content (X_7), soil pH (X_8), soil moisture (X_9), mean tree height (X_{10}), mean breast diameter (X_{11}), mean height under branches (X_{12}), mean canopy (X_{13}), and forest regeneration (X_{14}) were evaluated. Factor analysis, cluster analysis, discriminant analysis, and stepwise regression analysis were used to comprehensively assess the plantations. Fourteen single indicators were converted into four independent indicators through factor analysis. The contribution rates of the first four factors were 0.482%, 24.374%, 19.711%, and 8.646%, representing 83.212% of the original data variance. The health score value was calculated through the factor score coefficient matrix and the weight of each factor. Cluster analysis was performed on comprehensive health scores, and plots were divided into five categories: (I) a high-quality type, (II) a satisfied type, (III) a moderate type, (IV) a vulnerable type, and (V) an unhealthy type. The results of discriminant analysis and cluster analysis were similar. The accuracy of the self-verification and cross-validation were 100% and 85.185%. The optimal mathematical model for plantation health assessment was established as $H=0+0.293X_{13}+0.186X_5+0.079X_3+0.100X_2+0.038X_7$ (R^2=0.987). Five indexes for plantation health assessment were selected: Mean canopy, soil organic matter content, Simpson index, Pielou index and soil total phosphorus content. Mean canopy, soil organic matter content, Simpson index, Pielou index, and soil total phosphorus content could be used to assess the health of plantations in the region. The comprehensive assessment value of the five indexes could be calculated to predict healthy conditions by measuring the five indexes under the same conditions.

Keywords: plantations; factor analysis; cluster analysis; discriminant analysis; stepwise regression analysis; health assessment